УДК 621.317.727.1

ИНДУКТИВНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ С СИММЕТРИРУЮЩЕЙ ОБМОТКОЙ

В.Л. Ким

Томский политехнический университет
E-mail: sov@camsam.tpu.ru

В индуктивном делителе напряжения (ИДН), выполненном десятипроводным жгутом на ферромагнитном сердечнике, из-за неравенства эквивалентных емкостей, шунтирующих секции декадной обмотки, с увеличением частоты происходит резкий рост погрешности коэффициента передачи. Существенно снизить частотную погрешность (в 5 и более раз) возможно в ИДН с симметрирующей обмоткой (СО). Последний представляет собой сочетание бинарного делителя и пятисекционных обмоток, согласно последовательное соединение которых и образует декадную обмотку. При этом выравниваются эквивалентные емкости, и, следовательно, расширяется диапазон рабочих частот ИДН с СО.

Введение

Индуктивные делители напряжения обладают рядом высоких метрологических характеристик: точностью и стабильностью коэффициента передачи $K_n = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$, где $U_{вых}$ – выходное, $U_{вх}$ – входное напряжение делителя; малыми фазовыми погрешностями и выходным сопротивлением, недостижимыми в других типах делителей. Проектированию и применению ИДН в литературе уделено значительное внимание [1–4]. Наибольшее распространение получил декадный ИДН, который выполняется намоткой на тороидальный ферромагнитный сердечник многопроводного жгута, состоящего из десяти равномерно скрученных изолированных проводов. Назовем такой делитель индуктивным делителем первого типа – ИДН1. Относительная погрешность коэффициента передачи у ИДН1 в области средних частот 0,4...10 кГц равна $10^{-3}...10^{-4}$ %. Однако в области верхних частот (свыше 10 кГц) погрешность резко возрастает. Частотная погрешность определяется неравенством эквивалентных емкостей, шунтирующих секции делительной обмотки. Известные способы выравнивания этих емкостей малоэффективны, так как ведут к ухудшению других характеристик ИДН1, например, к уменьшению входного полного сопротивления. Существенное снижение погрешности в области верхних частот 10...100 кГц достигается в ИДН с СО.

Основы теории ИДН с симметрирующей обмоткой

Делительная обмотка в ИДН с СО выполняется несколькими жгутами, содержащими одинаковое и разное число проводов.

Рассмотрим принципы построения ИДН с СО на примере декадного делителя [5]. На рис. 1 приведена принципиальная схема такого делителя. На ферромагнитном сердечнике размещаются пять делительных обмоток: симметрирующая обмотка L_1, представляющая собой двоичный (бинарный) ИДН, и четыре отдельных пятисекционных обмоток L_2–L_5. СО L_1 выполняется жгутом, состоящим из двух равномерно скрученных проводов. Дополнительные обмотки L_2 и L_4 выполняются из жгута, состоящего из десяти равномерно скрученных проводов. При этом из пяти проводов образуется обмотка L_2, а из других пяти проводов – обмотка L_4. Обмотки L_2 и L_4 включаются согласно и параллельно. Аналогичным образом выполняются обмотки L_3 и L_5. Пары обмоток L_2, L_4 и L_3, L_5 соединяются согласно последовательно и образуют декадный ИДН.

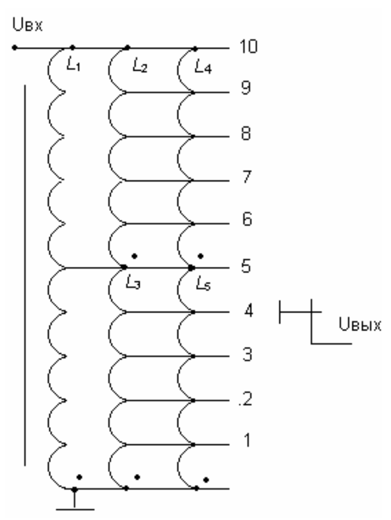


Рис. 1. *Принципиальная схема декадного ИДН с СО*

На рис. 2, *а, б* приведены схемы замещения выходной части ИДН1 и ИДН с СО, составленные на основе известных распределений эквивалентных емкостей пяти- и десятисекционных обмоток [3]. Как видно из этих рисунков, у ИДН с СО наблюдается не только выравнивание эквивалентных емкостей, шунтирующих секции декадной обмотки, но и их существенное уменьшение.

С целью упрощения анализ точности ИДН в области верхних частот проведем при следующих допущениях:

1) емкостные проводимости между обмотками и обмотками и сердечником равны нулю;
2) индуктивности рассеяния секций обмоток равны между собой;
3) все емкости между двумя проводами в жгуте одинаковы.

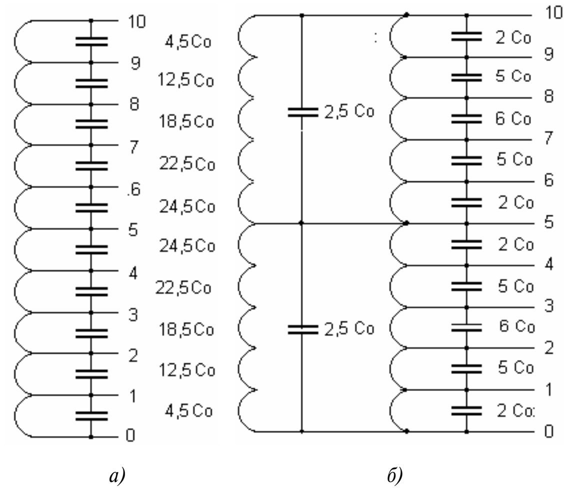


Рис. 2. *Распределение эквивалентных емкостей секций в ИДН1 (а) и ИДН с СО (б)*

Тогда выходные напряжения на отводах декадной обмотки ИДН можно рассчитать по формуле:

$$U_{вых_i} = U_{вх} \cdot \frac{i + (i-1)\sum_{j=1}^{i} \Delta j}{1 + \sum_{j=1}^{i} \Delta j} \times$$

$$\times \frac{1 + \sum_{j=1}^{5} \Delta j}{10 + 8\sum_{j=1}^{5} \Delta j} = U_{вх} K_n (1 - \delta K), \qquad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, ..., 10$ – номер отвода декады; K – относительная погрешность коэффициента передачи, $D_j = M_j \omega^2 L_S C_0$ – частотная погрешность j-й секции ($j = 1, 2, 3, ..., 10$). В формуле для частотной погрешности M_j – коэффициент при емкости C_0 соответствующей секции; C_0 – усредненная емкость между двумя проводами жгута; ω – круговая частота; L_S – индуктивность рассеяния секции.

Для ИДН1 расчеты по формуле (1) приводят к следующим выражениям:

$$\left.\begin{aligned} &U_{вых1} = 0{,}1 \cdot U_{вх}(1 - 12\Delta),\ U_{вых2} = 0{,}2 \cdot U_{вх}(1 - 8\Delta), \\ &U_{вых3} = 0{,}3 \cdot U_{вх}(1 - 4{,}7\Delta),\ U_{вых4} = 0{,}4 \cdot U_{вх}(1 - 2\Delta), \\ &\qquad U_{вых5} = 0{,}5 \cdot U_{вх}, \\ &U_{вых6} = 0{,}6 \cdot U_{вх}(1 + 1{,}3\Delta),\ U_{вых7} = 0{,}7 \cdot U_{вх}(1 + 2\Delta), \\ &U_{вых8} = 0{,}8 \cdot U_{вх}(1 + 2\Delta),\ U_{вых9} = 0{,}9 \cdot U_{вх}(1 + 1{,}3\Delta), \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где $\Delta = \omega^2 L_S C_0$.

Аналогично для отводов ИДН с СО получим

$$\left.\begin{aligned} &U_{вых1} = 0{,}1 \cdot U_{вх}(1 - 2\Delta),\ U_{вых2} = 0{,}2 \cdot U_{вх}(1 - 0{,}5\Delta), \\ &U_{вых3} = 0{,}3 \cdot U_{вх}(1 + 0{,}3\Delta),\ U_{вых4} = 0{,}4 \cdot U_{вх}(1 + 0{,}5\Delta), \\ &\qquad U_{вых5} = 0{,}5 \cdot U_{вх}, \\ &U_{вых6} = 0{,}6 \cdot U_{вх}(1 - 0{,}3\Delta),\ U_{вых7} = 0{,}7 \cdot U_{вх}(1 - 0{,}2\Delta), \\ &U_{вых8} = 0{,}8 \cdot U_{вх}(1 + 0{,}1\Delta),\ U_{вых9} = 0{,}9 \cdot U_{вх}(1 + 0{,}2\Delta). \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Из сравнения выражений (2) и (3) видно, что у ИДН с СО значения погрешностей меньше, чем у ИДН1: у отвода 1 наблюдается уменьшение погрешности в 6 раз, а у отвода 2 – в 16 раз и т.д.

Входную емкость всего ИДН с СО можно считать равной сумме входной емкости СО и входной емкости четырех последовательно-параллельно соединенных пятисекционных делителей. Тогда входная емкость ИДН с СО определяется следующим образом:

$$C_{вх2} = 1{,}25C_0 + 0{,}4C_0 = 1{,}65C_0.$$

В то же время входная емкость ИДН1 равна

$$C_{вх1} = 1{,}65C_0,$$

т.е. в этом случае $C_{вх2} = C_{вх1}$.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований были изготовлены опытные образцы ИДН1 и ИДН с СО. При этом использовались тороидальные сердечники из пермаллоя 79НМ (магнитная проницаемость μ=120000, индукция насыщения B = 0,35 Тл) размерами 80×40×30 мм. Жгуты были выполнены из провода марки ПЭЛШО диаметра 0,25 мм, общее число витков – 400 (L_S = 0,85 мкГн, C_0 = 300 пФ). Метрологические испытания ИДН с СО и ИДН1 проводились методом сравнения с мерой – образцовым ИДН типа Р755. В качестве измерителя разности напряжений использовался дифференциальный указатель Ф7239. Измерения на средней частоте 1 кГц показали, что относительная погрешность ИДН с СО не превышала $3 \cdot 10^{-4}$ %, что в 2 раза больше погрешности ИДН1. Это обусловлено неидентичностью параметров жгутов, из которых были выполнены обмотки L_2, L_4 и L_3, L_5. В то же время экспериментальные исследования подтвердили существенный выигрыш по точности ИДН с СО на верхних частотах (см. таблицу).

Таблица. *Расчетные и экспериментальные значения относительной погрешности K, % ИДН с СО и ИДН1 на частоте 100 кГц*

Тип ИДН		Коэффициент передачи $K_п$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ИДН1	расчетн.	-0,120	-0,080	-0,047	-0,020	0	0,013	0,020	0,020	0,013
	экспер.	-0,130	-0,060	-0,030	-0,025	0,005	0,015	0,025	0,022	0,013
ИДН с СО	расчетн.	-0,020	-0,005	0,003	0,005	0	-0,003	-0,002	0,001	0,002
	экспер.	-0,025	-0,008	0,002	0,003	0,005	-0,005	-0,004	0,002	0,003

Как следует из таблицы в ИДН с СО модуль максимальной относительной погрешности (при K_n=0,1) уменьшается в 5 раз. Это позволяет расширить частотный диапазон ИДН с СО приблизительно в 2 раза.

Результаты измерений подтвердили и другое важное преимущество ИДН с СО, обусловленное параллельным соединением обмоток L_2–L_5, – меньшие значения (в 1,1...1,5 раза в зависимости от номера отвода) выходных импедансов. Последние не превышали 5 Ом на частоте 100 кГц. Входная емкость ИДН с СО больше расчетной и, следовательно, входной емкости ИДН1 в 1,2 раза и равна 600 пФ. Расхождение расчетных и экспериментальных данных у ИДН с СО обусловлено идеализацией некоторых параметров ИДН с СО, указанных выше.

Заключение

Улучшение метрологических характеристик ИДН с СО достигается за счет использования трех жгутовых обмоток, что увеличивает расход по меди и несколько усложняет процесс изготовления делителей. Поэтому при создании многодекадного ИДН целесообразно применять ИДН с СО в качестве старшей декады, в основном определяющей точность всего устройства, а в качестве последующих декад – ИДН1.

В данной статье не рассматривались вопросы анализа случайной погрешности ИДН с СО, обусловленной стохастическими свойствами жгутов, их взаимодействием и влиянием сердечника. Эти и другие вопросы построения образцовых ИДН еще требуют детального исследования и будут предметом обсуждения последующих публикаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков В.М., Рождественская Т.Б. Новые виды трансформаторных делителей напряжения // Измерительная техника. – 1972. – № 1. – С. 59–61.
2. Гриневич Ф.Б., Грохольский А.Л., Соболевский К.М., Цапенко М.П. Трансформаторные измерительные мосты / Под ред. К.Б. Карандеева. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
3. Ройтман М.С., Калиниченко Н.П. Индуктивные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: Научно-техн. сб. обзоров ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1978. – Вып. 2(14) – С. 24–32.
4. Ройтман М.С., Ким В.Л., Калиниченко Н.П. Кодоуправляемые прецизионные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: Научно-техн. сб. обзоров ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1986. – Вып. 1(57) – С. 3–17.
5. А. с. 1049991 СССР. МКИ^3 H01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / М.С. Ройтман, А.И. Крамнюк, Н.П. Калиниченко, В.Л. Ким. – Опубл. 23.10.83, Бюл. № 39. – 3 с.

УДК 621.384.6